

露天坑固化回填与地下开采相互影响 模拟研究

Simulation Study on the Interaction between Open Pit Solidification Backfilling and Underground Mining

安晶^{1,2}, 宫长亮³, 陈小伟^{1,2}, 孙健³, 谢盛青¹, 张磊³, 熊赞民¹,
张建立³, 张少杰¹, 任鹏召¹

(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038; 2. 北京科技大学 北京 100083;
3. 鞍钢集团矿业有限公司大孤山分公司, 辽宁 鞍山 114046)

摘要:某铁矿为大型深凹露天矿, 露天开采结束后将转入地下开采。为阻断露天坑与地下的水力通道, 同时保持高陡边坡稳定, 计划采用尾砂胶结固化回填露天坑。本文采用数值模拟的方法, 对露天坑固化回填与地下开采的相互影响进行了模拟研究。结果表明, 露天坑固化回填与地下开采之间基本上不存在相互影响。研究结果可为类似开采条件下的矿山提供参考。

关键词:露天转地下开采; 露天坑回填; 尾砂胶结; 数值模拟

中图分类号: TD853 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2023)04-0010-06

Abstract: An iron mine is a large deep open pit. After the completion of open-pit mining, it will be transferred to underground mining. In order to block the hydraulic channel between the open pit and the underground, and maintain the stability of the high and steep slope, it is planned to backfill the open pit with cemented and solidified tailings. In this paper, the numerical simulation method is used to simulate the interaction between open pit solidification backfilling and underground mining. The results show that there is basically no interaction between open pit solidification backfilling and underground mining. The research results can provide reference for mines under similar mining conditions.

Key words: open-pit mining to underground mining; open-pit backfilling; cemented tailing; numerical simulation

1 前言

我国许多露天矿山随着浅部资源逐渐枯竭, 已经或正在转入地下开采, 对于露天转地下开采的矿山通常会面临地下深部开采危及露天边坡稳定性、尾矿库库容不足, 尾矿无法排放等问题^[1-3]。近些年来, 一些设计、研究单位和露天金属矿山陆续开展了露天坑固废回填工艺技术的探索研究, 该技术既能解决尾砂堆存问题, 又能减少存量边坡, 同时也能为地下开采创造相对有利的环境条件。因此, 开展露天坑回填与地下开采协同技术研究具有重要的理论意义和工程应用价值。

卢宏建等^[4]以石人沟铁矿露天采坑为工程背

景, 提出了利用尾砂胶结充填治理露天采坑的方案, 给出了各等级充填料浆灰砂比、浓度和分层高度等结构参数, 该方案既能消除露天坑安全隐患问题, 又能避免尾矿库建设难题, 也为露天采坑的恢复治理奠定了基础。谢盛青等^[5]以某铜矿露天采坑为工程背景, 提出了利用全尾砂胶结充填已形成的露天采坑的技术方案, 并分析了露天坑治理与地下开采的相互影响, 提出了露天坑治理的工程技术措施。彭勃等^[6]以西石门铁矿为工程背景, 提出了尾砂固结排放技术, 通过固结剂将尾矿进行固结处理后排放到该矿的塌陷坑内, 既解决了西石门铁矿尾矿库库容不足的问题, 同时还解决了该矿地表塌陷坑的回填和土地复垦等问题。王玉文等^[7]以吉林吉恩镍业股份有限公司大岭矿为工程背景, 对露天坑做尾矿库和地下矿岩稳定性进行了岩体力学研究, 同时采取露天坑防渗加固措施和胶结充填采矿, 并对露天地下过渡段的采矿工程进行了注浆加固, 采用浓密工艺将尾矿浓缩后排入露天坑, 使大岭矿露天

[作者简介] 安晶(1982—), 女, 高级工程师, 主要从事企业管理、项目管理和矿山相关研究工作。

[引用格式] 安晶, 宫长亮, 陈小伟, 等. 露天坑固化回填与地下开采相互影响模拟研究[J]. 中国矿山工程, 2023, 52(4): 10-15.

坑在做尾矿库的同时下部矿体能够安全回采。黄小忠等^[8]以马鞍山钢铁集团矿业公司姑山铁矿为工程背景,为了解决露天矿坑防水、随开采深度增加造成的边坡失稳以及因坑底破坏而存在尾矿溃出风险的问题,采用 COMSOL 软件建立了三维有限元模型,揭示了6种加固设计方案下矿坑回填过程中坑底加固结构及围岩位移场的演化规律,确定了合理的矿坑加固处理高度与全尾矿充填材料强度,坑底加固方案能够保证坑底的稳定、防渗及地下采矿的安全性要求。刘斌等^[9]以鲁南矿业王峪矿段深凹露天矿为工程背景,提出了露天坑底部排放尾砂的工艺,采用 ABAQUS 有限元软件,模拟了露天坑采结束-坑底干排尾砂-露天转地下第一阶段采矿全过程,分析了露天边坡位移变化趋势以及露天转地下采区的应力分布情况,得出结论:露天坑底排尾砂后地下开采区域应力场没有明显的增加,同时围岩体的塑性区域没有贯通。刘博等^[10]以长江中游某矿山为工程背景,对露天坑回填与地下开采的关联因素进行辨识,对露天坑回填与地下开采的力学关联进行了分析,并通过露天坑回填工况的模拟推演,研究了露天坑回填对地下采空区和巷道的影响。本文在参考借鉴上述研究的基础上,采用数值模拟方法,对某铁矿露天坑固化回填与地下开采的相互影响进行了分析,本研究对露天坑回填与地下开采协同技术的发展和建设绿色环保型矿山具有重要意义。

2 工程概况

某铁矿露天开采已有百年历史,已形成东西长 1 700 m、南北宽 1 520 m、垂直深约 500 m 椭圆形露天坑,露天坑底标高为 -414 m,整个矿坑呈倒金字塔形。露天开采结束后将转入地下开采。为阻断露天坑与地下的水力通道,避免构成淹井风险,同时保持高陡边坡稳定,保护周边排岩场和尾矿库等设施,计划采用尾砂胶结固化回填露天坑,使之逐步恢复到露采前的原始地貌,为生态修复治理创造条件。

露天坑固化回填过程中,为隔断露天采坑同地下开采的水力通道,保证地下生产安全,采用钢筋网+高强度充填体进行整体封底,其中 -414 ~ -394 m 采用 28 d 强度不低于 4 MPa 的尾砂胶结充填料浆进行回填,为直接底板; -394 ~ -354 m 采用 28 d 强度不低于 1.5 MPa 的尾砂胶结充填料浆

进行回填,为间接底板; -354 ~ -300 m 采用 28 d 强度不低于 1.0 MPa 的尾砂胶结充填料浆进行回填,为过渡层。-300 ~ -100 m 采用 28 d 强度不低于 0.5 MPa,浓度为 70% 的充填料浆进行回填;-100 ~ -98 m 采用 28 d 强度不低于 2 MPa,浓度为 70% 的充填料浆进行回填;-98 ~ +70 m 采用 28 d 强度不低于 0.5 MPa,浓度为 70% 的充填料浆进行回填。回填到 +70 m 后进行场地清表及平整碾压,然后进行客土覆盖,后续对土壤改良后,进行生态修复。

地下回采前于露天坑底部设置 20 m 护顶矿柱,于露天坑边坡四周留设 30 m 境界矿柱,具体如图 1 所示。地下开采主要是对 -324 ~ -674 m 的矿体进行回采,以 -494 m 水平为界分为上部采区和下部采区,上部采区矿体分为 -380 m、-430 m、-490 m 三个无轨开采中段,下部采区矿体分为 -550 m、-610 m、-670 m 三个无轨开采中段。上部和下部两个采区同时生产,各采区均按从下往上开采顺序进行开采。首采中段为 -490 m 中段和 -670 m 中段。地下开采将矿体划分为盘区,盘区沿走向布置,长度 120 m,中段高度 60 m。盘区间留设间柱,对于需要留设溜井的盘区间柱宽 34 m,不需要留设溜井的盘区矿柱宽 26 m。开采示意图如图 1 所示。

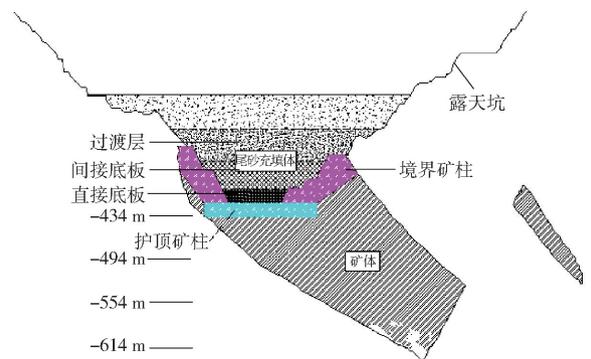


图1 露天坑固化回填、矿柱留设和地下开采中段划分示意图

3 数值模拟

3.1 计算模型

根据矿山的工程地质条件、露天坑固化回填方案和地下开采方案,建立了 FLAC^{3D} 三维有限差分数值模型。模型 X 轴垂直矿柱走向,长度为 3 800 m;模型 Y 轴沿矿柱走向,长度为 3 800 m;模型高为 900 m,具体如图 2 所示。为了更好地展示数值计算

结果,在模型中布置垂直Y轴的剖面A-A'(Y=1900 m)和水平剖面B-B'(Z=-460 m),具体如图3所示。剖面A-A'为经过露天坑最深处方且与地下开采留设的盘区间柱垂直的剖面。

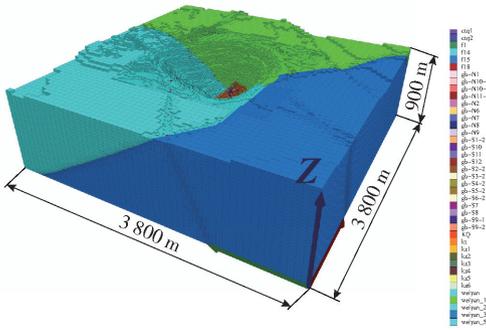


图2 三维数值模型

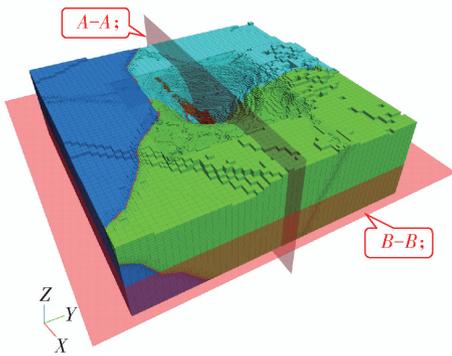


图3 分析剖面位置图

3.2 地应力特征及边界条件

根据矿山水压致裂地应力测量研究的数据显示:矿区应力场以水平应力为主导,最大水平主应力与垂直应力的平均比值为2.42,最小水平主应力与垂直应力的平均比值为1.49。平均最大主应力方向为N62.6°E。矿区测点的三个主应力随深度变化的线性回归方程为

$$S_H = 0.05122H + 5.15821 \quad (1)$$

$$S_h = 0.03104H + 3.34273 \quad (2)$$

$$S_V = 0.02819H \quad (3)$$

式中: S_H ——最大水平主应力,MPa;
 S_h ——最小水平主应力,MPa;
 S_V ——垂直应力,MPa
 H ——垂直深度,m。

考虑构造应力的影响,沿模型X轴和Y轴的水平应力根据式(1)和式(2)施加。模型侧面限制水平移动,模型底部限制垂直移动。

3.3 力学参数

根据现场工程地质调查和相关研究提供的岩石

力学试验结果,考虑到岩体的尺度效应,模拟计算采用的岩体力学参数见表1。

表1 岩体物理力学参数

岩性	密度 $\rho / \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	弹性模量 E / GPa	泊松比 μ	C / MPa	摩擦角 $\phi / (^\circ)$
磁铁石英岩	3070	20.04	0.21	0.541	33.5
太古代花岗岩	2650	25.55	0.26	0.405	35.7
绿泥石英片岩	2640	37.67	0.29	0.381	28.0
花岗斑岩	2720	30.53	0.26	0.385	31.5
回填体	2000	2.50	0.23	0.310	25.7

根据材料力学特征,围岩、矿体和回填体均采用复合摩尔-库仑屈服准则,即

$$f_s = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} - 2c \sqrt{\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}} \quad (4)$$

式中: f_s ——材料发生破坏的临界值,MPa;
 σ_1, σ_3 ——最大和最小主应力,MPa;
 C ——内聚力,MPa;
 ϕ ——摩擦角,MPa;

当 $f_s > 0$ 时,材料将发生剪切破坏。在通常应力状态下,岩体的抗拉强度很低,因此可根据抗拉强度准则($\sigma_3 \geq \sigma_t$ (抗拉强度,MPa))判断岩体是否产生拉破坏。

4 计算结果分析

4.1 露天坑固化回填对地下开采的影响分析

为了揭示露天坑固化回填对地下开采的影响,根据矿山的生产规划,露天坑固化回填方案和地下开采方案,确定了本节数值计算的模拟过程:(1)模拟露天坑的形成过程。(2)模拟露天坑固化回填至-44 m。(3)模拟地下-490 m和-670 m中段的开采。(4)模拟露天坑固化回填至0 m。(5)模拟露天坑固化回填至+70 m。从护顶矿柱、-490 m中段盘区矿柱及-670 m中段盘区矿柱中分别选取一个单元设置为监测点,通过监测点的应力变化,进一步量化分析露天坑固化回填对地下开采的影响。

-490 m和-670 m中段开采后的最大主应力场(剖面A-A')如图4所示。露天坑固化回填至0 m时的最大主应力场(剖面A-A')如图5所示。露天坑固化回填至+70 m时的最大主应力场(剖面A-A')如图6所示。通过对比可以看出,随着露天坑固化回填高度的不断增加,地下开采区域的最大主应力场基本没有明显变化。

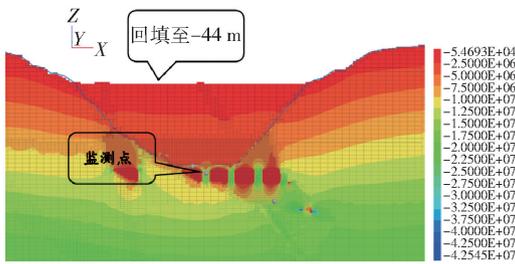


图4 -490 m和-670 m中段开采后的最大主应力场

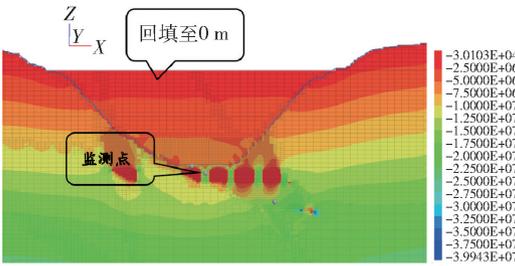


图5 露天坑固化回填至0 m时的最大主应力场

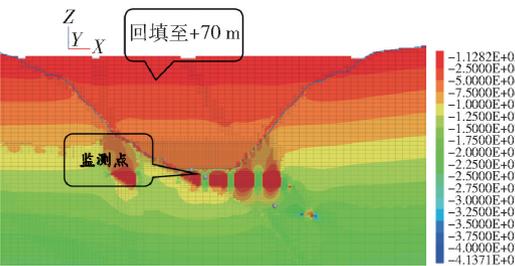


图6 露天坑固化回填至+70 m时的最大主应力场

露天坑固化回填至不同标高时监测点的应力变化对比见表2。从表中可以看出: -490 m和-670 m中段开采后,三个监测点的最大主应力分别为5.61 MPa、15.22 MPa、13.21 MPa;露天坑固化回填至0 m时,三个监测点的最大主应力分别为7.62 MPa、15.35 MPa、13.91 MPa;露天坑固化回填至+70 m时,三个监测点的最大主应力分别为8.75 MPa、16.09 MPa、14.27 MPa。对于护顶矿柱中的监测点1来讲:在露天坑固化回填的加载作用下,最大主应力值从5.61 MPa增加至8.75 MPa,有一定程度的增加。对于-490 m中段盘区矿柱中的监测点2来讲:随着露天坑固化回填高度的增加,最大主应力值从15.22 MPa增加至16.09 MPa,增加程度并不明显,说明露天坑固化回填不会对-490 m中段的盘区矿柱的承载作用产生明显影响。对于-670 m中段盘区矿柱中的监测点3来讲:随着露天坑固化回填高度的增加,最大主应力值从13.21 MPa增加至14.27 MPa,增加程度并不明显,说明露天坑固化回填不会对-670 m中段的盘区矿柱的承载作用产生明显影响。综上所述,露天坑固化回填基本上不会对地下开采产生影响。

-490 m和-670 m中段开采后的塑性区分布(剖面A-A')如图7所示。露天坑固化回填至0 m时的塑性区分布(剖面A-A')如图8所示。露天坑固

表2 露天坑固化回填至不同标高时监测点的应力变化对比

监测点 编号	监测点 所在位置	-494 m和-674 m	露天坑固化回填	露天坑固化回填	影响程度
		中段开采后的 应力值/MPa	至0 m时的 应力值/MPa	至+70 m时的 应力值/MPa	
监测点1	护顶矿柱中	5.61	7.62	8.75	有一定程度的增加(露天坑固化回填的加载作用)
监测点2	-494 m中段盘区 矿柱中	15.22	15.35	16.09	增加程度并不明显,表明露天坑固化回填不会对-494 m中段的盘区矿柱的承载作用产生明显影响
监测点3	-674 m中段盘区 矿柱中	13.21	13.91	14.27	增加程度并不明显,表明露天坑固化回填不会对-674 m中段的盘区矿柱的承载作用产生明显影响

化回填至+70 m时的塑性区分布(剖面A-A')如图9所示。通过对比可以看出,与-490 m和-670 m中段开采后的塑性区分布相比,露天坑固化回填至0 m、以及露天坑固化回填至+70 m的塑性区分布基本没有明显变化,说明露天坑固化回填基本上不会对地下开采产生影响。

4.2 地下开采对露天坑固化回填的影响分析

为了揭示地下开采对露天坑固化回填的影响,根据矿山的生产规划、露天坑固化回填方案和地下开采方案,确定了本节数值计算的模拟过程:(1)模拟露天坑的形成过程。(2)模拟露天坑固化回填至0 m。(3)模拟地下-490 m和-670 m中段的开采。在露天坑固化回填体中、露天坑边坡中分别选取一

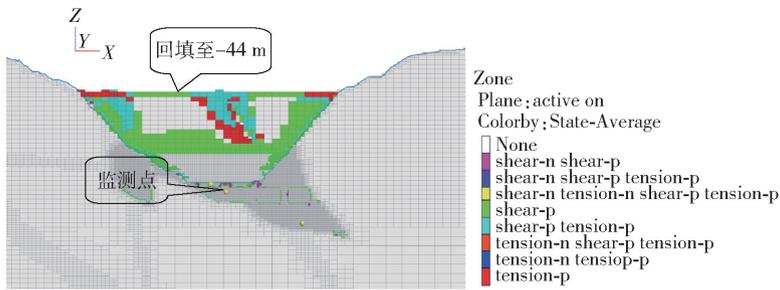


图7 -490 m 和 -670 m 中段开采后的塑性区分布

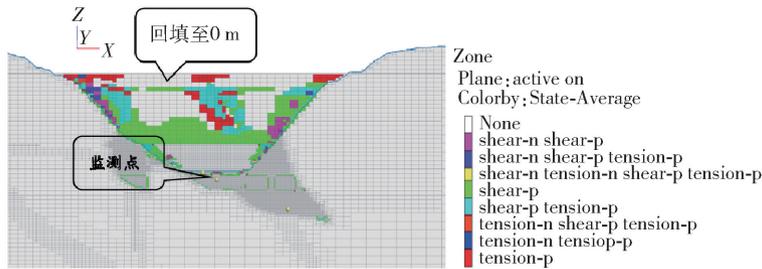


图8 露天坑固化回填至0 m 时的塑性区分布

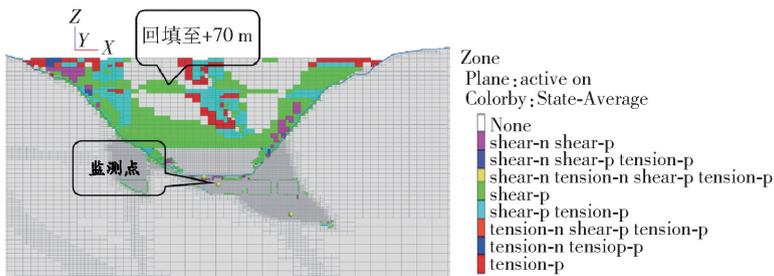


图9 露天坑固化回填至 +70 m 塑性区分布

个单元设置为监测点,通过监测点的应力变化,进一步量化分析地下开采对露天坑固化回填的影响。

-490 m 和 -670 m 中段开采前的最大主应力场(剖面 A-A')如图 10 所示。-490 m 和 -670 m 中段开采后的最大主应力场(剖面 A-A')如图 11 所示。通过对比可以看出,-490 m 和 -670 m 中段开采前后,露天坑的最大主应力场基本没有明显变化。

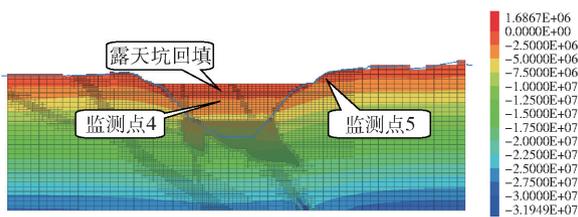


图10 -490 m 和 -670 m 中段开采前的最大主应力场

地下开采不同阶段时监测点的应力对比分析见表 3。从表中可以看出:对于露天坑固化回填体中监测点 4 来讲,-490 m 和 -670 m 中段开采前露天

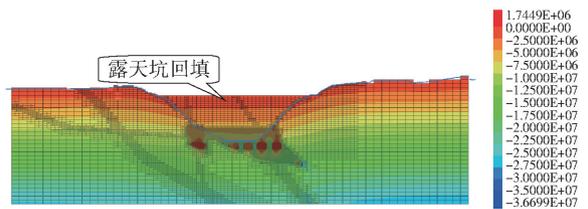


图11 -490 m 和 -670 m 中段开采后的最大主应力场

坑固化回填体中监测点 4 的最大主应力为 2.6 MPa; -490 m 和 -670 m 中段开采后露天坑固化回填体中监测点 4 的最大主应力仍为 2.6 MPa,说明 -490 m 和 -670 m 中段开采对露天坑固化回填基本无影响。对于露天坑边坡中监测点 5 来讲,-490 m 和 -670 m 中段开采前露天坑边坡中监测点 5 的最大主应力为 1.8 MPa; -490 m 和 -670 m 中段开采后露天坑边坡中监测点 5 的最大主应力为 1.7 MPa,减小值仅为 0.1 MPa,说明 -490 m 和 -670 m 中段开采对露天坑边坡基本无影响。

表3 地下开采不同阶段时监测点的应力变化对比

监测点 编号	监测点 所在位置	-494 m 和 -674 m 中段开采 前的应力值/MPa	-494 m 和 -674 m 中段 开采后的应力值/MPa	影响程度
监测点 4	露天坑固化回 填体中	2.6	2.6	应力值不变,表明 -494 m 和 -674 m 中段 开采对露天坑固化回填基本无影响
监测点 5	露天坑边坡中	1.8	1.7	减小值仅为 0.1 MPa,表明 -494 m 和 -674 m 中段开采对露天坑边坡基本无影响

-490 m 和 -670 m 中段开采前的塑性区分布(剖面 A-A')如图 12 所示。-490 m 和 -670 m 中段开采后的塑性区分布(剖面 A-A')如图 13 所示。通过对比可以看出,-490 m 和 -670 m 中段开采前后,露天坑的塑性区分布基本没有明显变化,说明 -490 m 和 -670 m 中段开采对露天坑固化回填基本无影响。

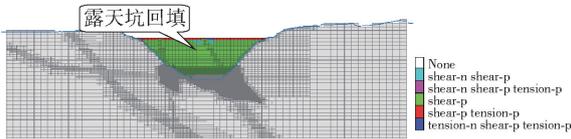


图 12 -490 m 和 -670 m 中段开采前的塑性区分布

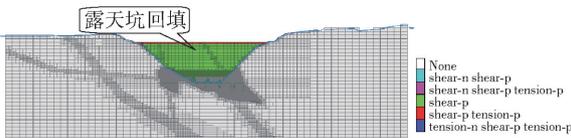


图 13 -490 m 和 -670 m 中段开采后的塑性区分布

5 结论

本文根据矿山的工程地质条件、露天坑固化回填方案和地下开采方案,构建了 FLAC^{3D} 三维数值模型,对某大型深凹露天坑固化回填与地下开采的相互影响进行了分析研究,得到以下结论:

(1)随着露天坑固化回填体高度的不断增加,护顶矿柱中的应力有一定程度的增加,为露天坑固化回填的加载作用引起;-494 m 中段盘区矿柱和 -674 m 中段盘区矿柱的应力增加程度并不明显,表明露天坑固化回填基本上不会对地下开采产生影响。

(2)-494 m 和 -674 m 中段开采前后,露天坑回填体和露天边坡中的单元应力基本没有变化,表明 -494 m 和 -674 m 中段开采基本上不会对露天坑固化回填产生影响。

(3)综上所述,露天坑固化回填和地下开采之间基本上不存在相互影响。为了矿山地下开采的安全,建议在实际开采过程中加强护顶矿柱和盘区矿柱的应力、变形等监测。

[参考文献]

- [1] 路增祥,蔡美峰.金属矿山露天转地下开采关键技术[M].北京:冶金工业出版社,2019.
- [2] 任凤玉,李海英.金属矿床露天转地下协同开采技术[M].北京:冶金工业出版社,2018.
- [3] 南世卿,杨天鸿.露天转地下开采围岩稳定与安全防灾[M].北京:冶金工业出版社,2013.
- [4] 卢宏建,梁鹏,杜英男,等.金属矿山露天坑尾砂胶结充填治理[J].金属矿山,2017(4):36-40.
- [5] 谢盛青,杜贵文,张少杰.废弃露天坑充填治理技术研究[J].中国矿山工程,2018(1):1-4.
- [6] 彭勃.尾砂固结排放技术及其应用研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2013.
- [7] 王玉文,耿隽嵩.露天采坑做尾矿库的研究与实践[J].采矿技术,2008(3):81-83.
- [8] 黄小忠,石永豹,李国平.姑山矿露天坑底加固关键技术研究[J].现代矿业,2020,36(12):201-203.
- [9] 刘斌,侯大德,孙国权.深凹露天坑排尾砂后地下采区稳定性分析[J].金属矿山,2016(3):30-34.
- [10] 刘博,李益龙,黄英华,等.露天坑回填协同地下开采力学关联分析[J].矿业研究与开发,2023,43(2):30-36.